



การศึกษาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของระบบรถไฟไฟฟ้าเชื่อมต่ออากาศยานสุวรรณภูมิ

A STUDY OF VOLTAGE UNBALANCE FOR SUVARNABHUMI AIRPORT RAIL LINK SYSTEM

ณัฐพงษ์ มิ่งพุกญา¹ ทศพล รัตนนิมชัย² และธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์³

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของรถไฟไฟฟ้ากระแสสลับด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink โดยการประเมินตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า เมื่อพิจารณารูปแบบการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าติดตั้งที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับที่แตกต่างกัน 5 รูปแบบ ได้แก่ การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี แบบสกอตต์ และแบบเลอบลองก์ ควบคู่ไปกับการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาการเดินรถไฟและน้ำหนักสุทธิของรถไฟ รถไฟฟ้าเชื่อมต่ออากาศยานสุวรรณภูมิ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ถูกนำมาใช้เป็นกรณีศึกษา ประกอบด้วยสถานีผู้โดยสาร 8 สถานี มีระยะทางบริการทั้งหมด 28.298 km ใช้ระบบปฏิบัติการ ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดสัมผัสเหนือศีรษะ 25 kV จากผลการจำลองพบว่า ตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.1792% เมื่อเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอบลองก์ ดังนั้นการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้ารูปแบบนี้สามารถลดผลกระทบของความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า สำหรับการปรับปรุงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในปัจจุบันและส่วนต่อขยายของระบบรถไฟไฟฟ้าเชื่อมต่ออากาศยานสุวรรณภูมิ ในอนาคต

คำสำคัญ: รถไฟฟ้ากระแสสลับ, ตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า, การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้า

ABSTRACT

This paper presents a study of voltage unbalance of a power supply system in an AC electrified railway using MATLAB/Simulink program. The voltage unbalance is evaluated by the voltage unbalance factor at the traction substation based on the different types of transformer connections: single-phase connection, cyclic winding connection, V connection, Scott connection, and LeBlanc connection. Suvarnabhumi Airport Rail Link or Airport Link - Bangkok, Thailand is chosen to be a test system with different scenarios of the train headways and masses. The test system is operated by an AC electrified power feeding scheme via 25 kV overhead catenary system. The total service distance of the Airport Link is 28.298 km with 8 passenger stations. As the results, the lowest voltage unbalance factor of 0.1792% achieves by the use of the LeBlanc connection. Therefore, it is recommended to use this type of the transformer connection to reduce the effect of the voltage unbalance of the power supply for improving the present traction substation and planning the line extension of the Airport Link in the future.

KEYWORDS: AC electrified railway, voltage unbalance factor, transformer connection

1. บทนำ

ในปัจจุบันระบบการขนส่งมวลชนทางบกนับว่าเป็นรูปแบบการขนส่งมวลชนที่ได้รับความนิยมค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการขนส่งมวลชนประเภทอื่น ๆ และระบบการขนส่งมวลชนทางบกที่สามารถขนส่งผู้โดยสารได้เป็นจำนวนมากในระยะเวลาอันสั้น ได้แก่ ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน วัตถุประสงค์หลักของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน คือ การให้ความสำคัญกับการลงทุนที่จะช่วยให้เกิดการประหยัดพลังงาน และการลดต้นทุนการขนส่ง ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนโดยทั่วไปประกอบด้วยระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ สำหรับรถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย เป็นระบบปฏิบัติการไฟฟ้ากระแสสลับชนิดสัมผัสเหนื่อศีรษะ 25 kV ปัจจุบันมีการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบสลับคู่เฟส ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงจะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสของการไฟฟ้านครหลวง และด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจะเชื่อมต่อกับโหลดรถไฟ และโหลดบริการในสถานีซ่อมบำรุงและสถานีผู้โดยสาร สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับเป็นปัจจัยหลักในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบรถไฟฟ้า ระบบรถไฟฟ้าเป็นโหลดทางไฟฟ้าที่ไม่ต่อเนื่อง กำลังไฟฟ้าจะถูกจ่ายเพื่อขับเคลื่อนรถไฟในปริมาณที่สูงและระยะเวลาสั้นขณะรถไฟกำลังเร่งออกจากสถานีผู้โดยสาร จนกระทั่งความเร็วคงที่ กำลังไฟฟ้าคงที่ หลังจากนั้นกำลังไฟฟ้าจะลดลงเป็นศูนย์เมื่อรถไฟจอดที่สถานีผู้โดยสารต่อไป โดยทั่วไปปัญหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ คือ ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า และแรงดันตกที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ [1] และในอนาคตอันใกล้การรถไฟแห่งประเทศไทย (ร.ฟ.ท.) มีแผนการขยายเส้นทางรถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิไปยังท่าอากาศยานดอนเมือง ดังนั้นเส้นทางบริการผู้โดยสารจะยาวมากขึ้น และจำนวนรถไฟจะมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับที่บริการอยู่ในปัจจุบันจะมีแนวโน้มการจ่ายโหลดรถไฟที่มากขึ้น และปัญหาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าและแรงดันตกที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับมากขึ้นด้วยเช่นกัน ปัญหาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่เกินมาตรฐาน จะมีความเสี่ยงทำให้ระบบไฟฟ้าขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า อุปกรณ์ป้องกันความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าทำงาน และระบบไฟฟ้าอาจจะล้มได้ การลดความเสียหายในระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่เกิดจากความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า ทางเลือกหนึ่งสามารถทำได้โดยการเลือกใช้การเชื่อมต่อหม้อแปลงที่เหมาะสมติดตั้งที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

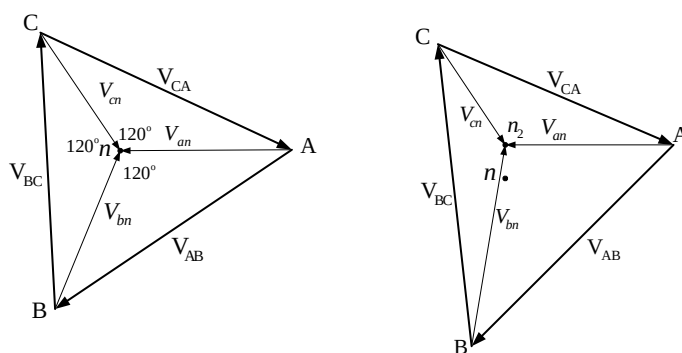
บทความนี้มุ่งเน้นความสำคัญในประเด็นดังกล่าว จึงนำเสนอการศึกษาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ เมื่อพิจารณาการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ เนื้อหาในบทความแบ่งเป็น 5 หัวข้อ ดังนี้ หัวข้อที่ 1 นำเสนอบทนำ หัวข้อที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟ และการคำนวณกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟ หัวข้อที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับรูปแบบต่าง ๆ หัวข้อที่ 4 นำเสนอผลการจำลอง และหัวข้อสุดท้ายนำเสนอสรุปผลการศึกษา

2. วิธีการศึกษา

ทฤษฎีพื้นฐานของการศึกษาในบทความนี้ประกอบด้วยนิยามความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า และมาตรฐานที่ใช้วิเคราะห์หาค่าตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า นอกจากนี้ทฤษฎีที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ระบบรถไฟฟ้า คือ การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟ และการคำนวณกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟ โดยสามารถคำนวณได้จากโปรแกรมการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟ [2]

2.1 ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า

ในทางอุดมคติแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของอุปกรณ์ไฟฟ้าสามเฟสที่เชื่อมต่อการไฟฟ้าฯ จะมีขนาด และมุมระหว่างเฟสเท่ากัน เรียกว่า ความสมดุลแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 1 ก) แรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสเทียบกับจุดนิวทรัล (n) มีขนาดเท่ากัน ($|V_{an}| = |V_{bn}| = |V_{cn}|$) และมุมระหว่างเฟสห่างกัน 120° ($\theta_{ab} = \theta_{bc} = \theta_{ca} = 120^\circ$) ส่งผลทำให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสมีค่าเท่ากัน ($|V_{AB}| = |V_{BC}| = |V_{CA}|$) ในทางตรงกันข้ามถ้าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสมีขนาด และมุมระหว่างเฟสไม่เท่ากัน เรียกว่า ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 1 ข) แรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสเทียบกับจุดนิวทรัล (n_2) มีขนาดไม่เท่ากัน ($|V_{an}| \neq |V_{bn}| \neq |V_{cn}|$) และมุมระหว่างเฟสไม่เท่ากัน ($\theta_{ab} \neq \theta_{bc} \neq \theta_{ca}$) ส่งผลทำให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสมีค่าไม่เท่ากัน ($|V_{AB}| \neq |V_{BC}| \neq |V_{CA}|$) ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้านี้สามารถสังเกตได้จากการเคลื่อนย้ายของจุดนิวทรัลจากตำแหน่ง n ไปเป็นตำแหน่ง n_2 ผลเสียของการเกิดความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าในลักษณะเช่นนี้ อาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดสามเฟส เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าชำรุดเสียหายได้ง่าย มีอายุการใช้งานและประสิทธิภาพลดลง [2] เป็นต้น



ก) สภาวะสมดุล (Symmetrical) ข) สภาวะไม่สมดุล (Asymmetrical)

รูปที่ 1 เฟสเซอร์ของแรงดันไฟฟ้าสามเฟส

มาตรฐาน IEEE 1159 – 2009 [3] เป็นมาตรฐานที่ใช้วิเคราะห์หาค่าตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า (Voltage unbalance factor: VUF) กล่าวว่าความไม่สมดุลในระบบไฟฟ้าสามเฟส คือ อัตราส่วนของส่วนประกอบสมมาตรลำดับเฟสลบ กับ ส่วนประกอบสมมาตรลำดับเฟสบวกที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ตามสมการที่ (1) คำนี้นี้สามารถนำมาใช้หาค่าตัวประกอบความไม่สมดุลไฟฟ้าได้ทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ในมาตรฐาน IEEE 1159 – 2009 กำหนดค่าเปอร์เซ็นต์สำหรับตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าต้องมีค่าไม่เกิน 2% โดยพิจารณาที่ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

$$\%VUF = \left| \frac{V_{neg}}{V_{pos}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

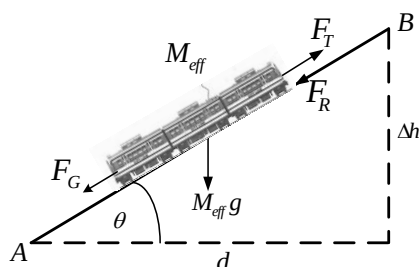
เมื่อ $\%VUF$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า

V_{pos} คือ แรงดันไฟฟ้าสมมาตรลำดับเฟสบวก

V_{neg} คือ แรงดันไฟฟ้าสมมาตรลำดับเฟสลบ

2.2 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าบนทางลาดชัน ดังรูปที่ 2 สามารถอธิบายได้ด้วยกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันตามสมการที่ (2) กล่าวคือ ผลลัพธ์ของแรงที่เกี่ยวข้องในการเคลื่อนที่ ได้แก่ แรงลากจูง แรงเสียดทาน และแรงโน้มถ่วง มีค่าเท่ากับมวลทั้งหมดของรถไฟฟ้าคูณด้วยความเร่งของรถไฟฟ้า [4] และสมการแรงโน้มถ่วงตามสมการที่ (3)



รูปที่ 2 แผนภาพแรงอิสระของรถไฟฟ้าที่กำลังเคลื่อนที่ขึ้นทางลาดชันเป็นมุม θ

$$F_T - F_R - F_G = M_{eff} a \quad (2)$$

$$F_G = M_{eff} g \sin \theta \quad (3)$$

เมื่อ F_T คือ แรงลากจูง (N)

F_R คือ แรงเสียดทาน (N)

F_G คือ แรงโน้มถ่วง (N)

a คือ ความเร่งของรถไฟฟ้า (m/s^2)

M_{eff} คือ มวลทั้งหมด (kg)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, $9.8 (\text{m/s}^2)$

แรงเสียดทานทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากสมการของ Davis ตามสมการที่ (4) การคำนวณแรงเสียดทานในการศึกษา
งานวิจัยนี้จะใช้เพียงแรงเสียดทานที่คำนวณจากสมการของ Davis [5]

$$F_R = A + Bv + Cv^2 \quad (4)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วของรถไฟฟ้า (km/h) และสัมประสิทธิ์ของ Davis (ค่าคงที่) ประกอบด้วย A (kN), B (kNh/km) และ C (kNh^2/km^2)

2.3 กำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) สำหรับการศึกษางานวิจัยนี้กำลังไฟฟ้าขับเคลื่อน
รถไฟฟ้าจะรวมอยู่ในโปรแกรมการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า [2]

$$P = \frac{F_T \times v}{\eta} + P_{aux} \quad (5)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟ (kW)

η คือ ประสิทธิภาพของการแปลงพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า [6]

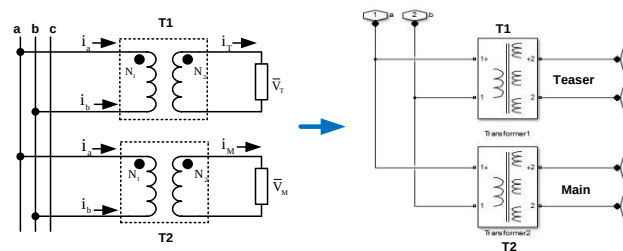
P_{aux} คือ โหลดของอุปกรณ์ไฟฟ้าบนรถไฟ (kW)

3. แบบจำลองการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ

ในงานวิจัยนี้แบบจำลองการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบต่าง ๆ ได้แก่ การเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี แบบสกอตต์ และแบบเลอบลองก์ [7] มาทดสอบกับระบบรถไฟที่เชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ขณะขับเคลื่อน และสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ และตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบต่าง ๆ ตามลำดับ แบบจำลองการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบต่าง ๆ สามารถนำเสนอได้ด้วยบล็อก Multi-Winding Transformer ของ MATLAB Simulink มีโครงสร้างดังต่อไปนี้

3.1 แบบจำลองการเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบเฟสเดียว (Single-phase connection model)

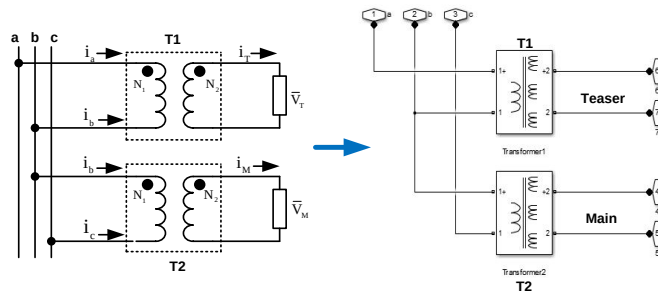
การเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบเฟสเดียว คือ การเชื่อมต่อหม้อแปลง 1 เฟส 2 ชุด แต่ละชุดมีขดลวดด้านปฐมภูมิ 1 ขด ด้านทุติยภูมิ 1 ขด ด้านปฐมภูมิต่อกับคู่เฟสเดียวกันคือ คู่เฟส a-b ส่วน $\bar{V}_M$ คือ โหลดแรงดันฝั่ง Main และ $\bar{V}_T$ คือ โหลดแรงดันฝั่ง Teaser ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แบบจำลองการเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบเฟสเดียวใน MATLAB Simulink

3.2 แบบจำลองการเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบสลับคู่เฟส (Cyclic winding connection model)

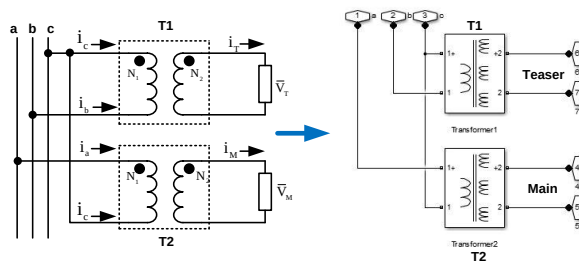
การเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบสลับคู่เฟส คือ การเชื่อมต่อหม้อแปลง 1 เฟส 2 ชุด แต่ละชุดมีขดลวดด้านปฐมภูมิ 1 ขด ด้านทุติยภูมิ 1 ขด ด้านปฐมภูมิต่อสลับคู่เฟสกัน คือ ชุดที่ 1 คู่เฟส a-b และชุดที่ 2 คู่เฟส b-c และในปัจจุบันรถไฟที่เชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิใช้การเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบสลับคู่เฟสดังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงแบบสลับคู่เฟสใน MATLAB Simulink

3.3 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงแบบวี (V – connection model)

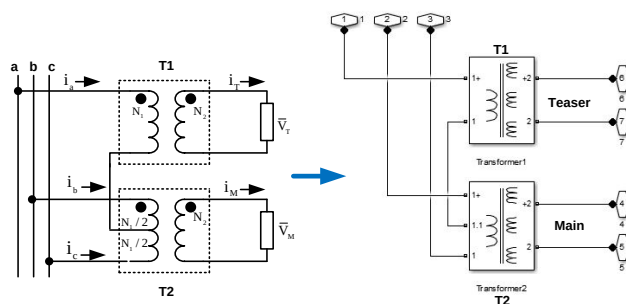
การต่อหม้อแปลงแบบวี คือ การต่อหม้อแปลง 1 เฟส 2 ชุด แต่ละชุดมีขดลวดด้านปฐมภูมิ 1 ขด ด้านทุติยภูมิ 1 ขด ด้านปฐมภูมิต่อสลับคู่เฟสกันคือ ชุดที่ 1 คู่เฟส c-b และชุดที่ 2 คู่เฟส a-c หรือต่อแบบเดลตาเปิด 1 ด้าน ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงแบบวีใน MATLAB Simulink

3.4 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงแบบสกอตต์ (Scott connection model)

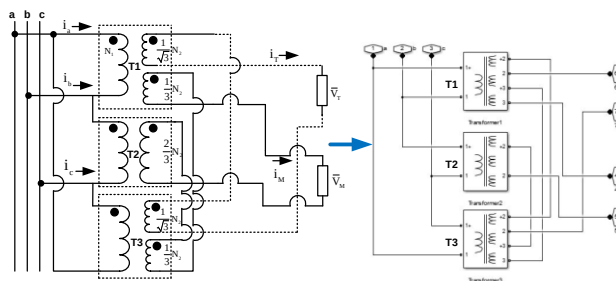
การต่อหม้อแปลงแบบสกอตต์ คือ การต่อหม้อแปลง 1 เฟส 2 ชุด แต่ละชุดมีขดลวดด้านปฐมภูมิ 1 ขด ด้านทุติยภูมิ 1 ขด แต่หม้อแปลงด้านปฐมภูมิฝั่งโหลดแรงดัน Main จะเป็นหม้อแปลงชนิดพิเศษแบบมีแท่งกลาง ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงชุดที่ 1 ต่อกับเฟส a และแท่งกลางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงชุดที่ 2 และด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงชุดที่ 2 ต่อกับคู่เฟส b-c ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงแบบสกอตต์ใน MATLAB Simulink

3.5 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงแบบเลอบลองก์ (LeBlanc connection model)

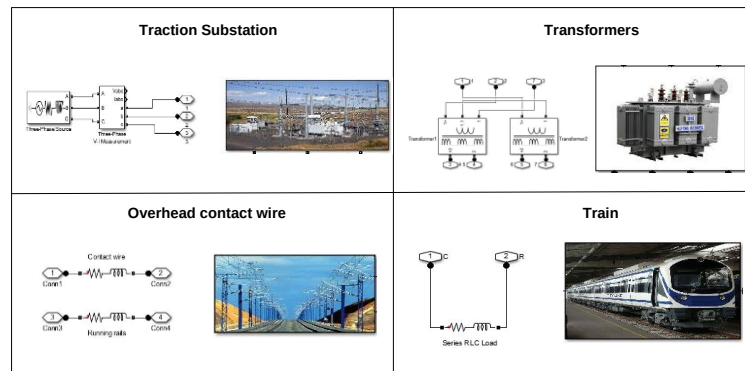
การต่อหม้อแปลงแบบเลอบลองก์ คือ การต่อหม้อแปลง 1 เฟส 3 ชุด แต่ละชุดจะมีจำนวนขดลวดด้านปฐมภูมิกับด้านทุติภูมิไม่เท่ากัน ด้านปฐมภูมิต่อแบบเดลตา ส่วนด้านทุติภูมิมีการเชื่อมต่อที่ซับซ้อน ดังรูปที่ 7



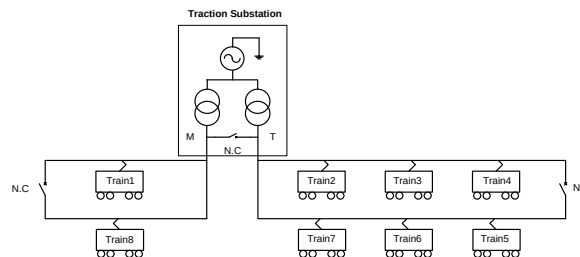
รูปที่ 7 แบบจำลองการต่อหม้อแปลงแบบเลอบลองก์ใน MATLAB Simulink

3.6 แบบจำลองระบบการทำงานของรถไฟฟ้ามหานครในโปรแกรม MATLAB Simulink

แบบจำลองความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของการต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับในงานวิจัยนี้พัฒนาขึ้นจากโปรแกรม MATLAB Simulink ประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ แบบจำลองระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า แบบจำลองสายส่งพาดอากาศ และรางวิ่ง และแบบจำลองขบวนรถไฟไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 8 ส่วนที่หนึ่งแบบจำลองระบบสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ หรือแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส 69 kV แทนด้วยบล็อก Three-Phase Source กำหนดพารามิเตอร์ แรงดันอาร์เอ็มเอสระหว่างเฟส 69 kV ความถี่ 50 Hz และ พิกัดกำลังไฟฟ้าลัดวงจรสามเฟส 2.7 GVA ส่วนที่สองแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าจะแปลงแรงดันไฟฟ้าอาร์เอ็มเอสจาก 69 kV เป็น 27.5 kV ในการทดสอบจะทำการเปลี่ยนการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี แบบสกอตต์ และแบบเลอบลองก์ตามหัวข้อที่ 3.1 - 3.5 แทนด้วยบล็อก Multi-Winding Transformer เชื่อมต่อในรูปแบบต่าง ๆ ตามลำดับ ส่วนที่สามแบบจำลองสายส่งพาดอากาศ (catenary wire) และรางวิ่ง (rail) มีค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งพาดอากาศ $0.184 + j0.604 \Omega/\text{km}$ และรางวิ่ง $0.37 + j8.926 \Omega/\text{km}$ [8] และตามมาตรฐาน BS EN 50149:2012 [9] แทนด้วยบล็อก Series RLC Branch ส่วนสุดท้ายแบบจำลองขบวนรถไฟฟ้ามหานครแทนด้วยบล็อก Series RLC Load ผลที่ได้จากการจำลองผลของขบวนรถไฟไฟฟ้า คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า ความถี่ และกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้ามหานครในทุก ๆ ช่วงเวลาของการเคลื่อนที่อ้างอิงจากหัวข้อ 2.2 และ 2.3 โดยที่ปริมาณดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ประเมินความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าต่อไป ระยะทางให้บริการของแบบจำลองระบบรถไฟฟ้ามหานครเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ มีระยะทางรวมทั้งหมด 28.298 km ตำแหน่งของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับอยู่ที่ 8.078 km จากสถานีพญาไท การจำลองสถานการณ์กำหนดให้รถไฟฟ้ามหานครขบวนที่ 1 (Train 1) และรถไฟฟ้ามหานครขบวนที่ 5 (Train 5) ขับเคลื่อนพร้อมกันในทิศทางตรงกันข้ามกัน เมื่อถึงช่วงระยะเวลาห่างระหว่างรถไฟฟ้ามหานครขบวนที่วิ่งไปในทิศทางเดียวกันบนรางเดียวกัน (headway) รถไฟฟ้ามหานครขบวนที่ 2 (Train 2) กับรถไฟฟ้ามหานครขบวนที่ 6 (Train 6) จะขับเคลื่อนตามตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 8 แบบจำลองระบบรถไฟใน MATLAB Simulink



รูปที่ 9 แบบจำลองการเคลื่อนที่ระบบรถไฟสำหรับระบบทดสอบ

4. ผลการจำลอง

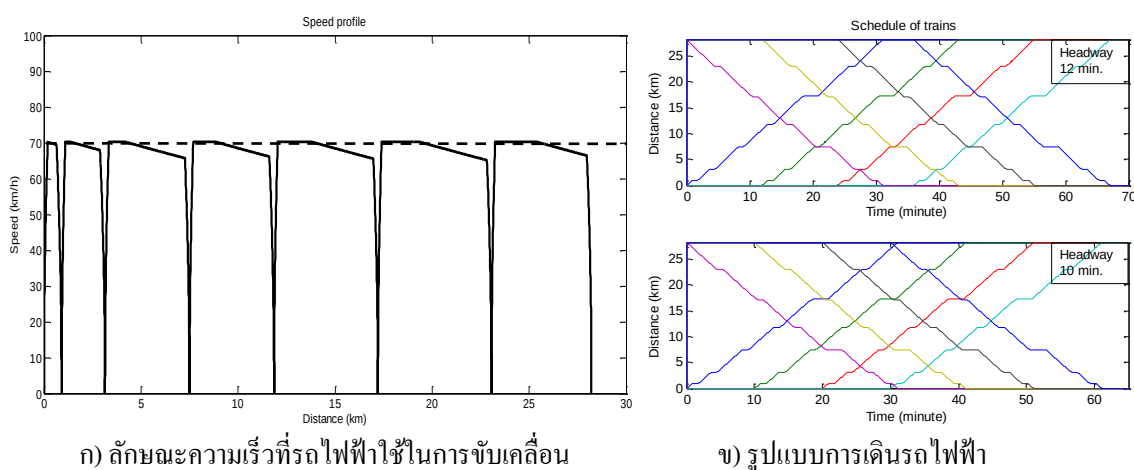
การจำลองผลจะใช้การเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบต่าง ๆ ได้แก่ การเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี แบบสกอตต์ และแบบเลอบลองก์ คำนวณค่าตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ (City Line) มีสถานีผู้โดยสารทั้งหมด 8 สถานี ได้แก่ สุวรรณภูมิ ลาดกระบัง บ้านทับช้าง หัวหมาก รามคำแหง มกกะสัน ราชปรารภ และพญาไท [1] ดังรูปที่ 10 รูปแบบเงื่อนไขการจำลองผลนำเสนอในตารางที่ 1 โดยที่รถไฟไฟฟ้าแต่ละขบวนมีความเร็วสูงสุด 70 km/h ลักษณะความเร็วของรถไฟไฟฟ้าขณะขับเคลื่อน แสดงดังรูปที่ 11 ก) และรูปแบบการเดินรถประกอบด้วย headway 3 แบบ คือ 15, 12 และ 10 min ทั้งสาม headway จะมีรถไฟให้บริการจากขาออกจากพญาไท – สุวรรณภูมิ และขาเข้าจากสุวรรณภูมิ – พญาไท ขาละ 4 ขบวน รวมเป็น 8 ขบวน สำหรับ headway 15 min จะใช้เวลาเดินรถทั้งสิ้น 76 min สำหรับ headway 12 min จะใช้เวลาเดินรถทั้งสิ้น 69 min และ headway 10 min จะใช้เวลาเดินรถทั้งสิ้น 63 min ช่วงเวลาจอด (dwell time) ที่ทุก ๆ สถานีเท่ากับ 30 s ยกเว้นสถานีหัวหมากจะเท่ากับ 120 s ดังรูป 11 ข)



รูปที่ 10 แผนที่รถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ

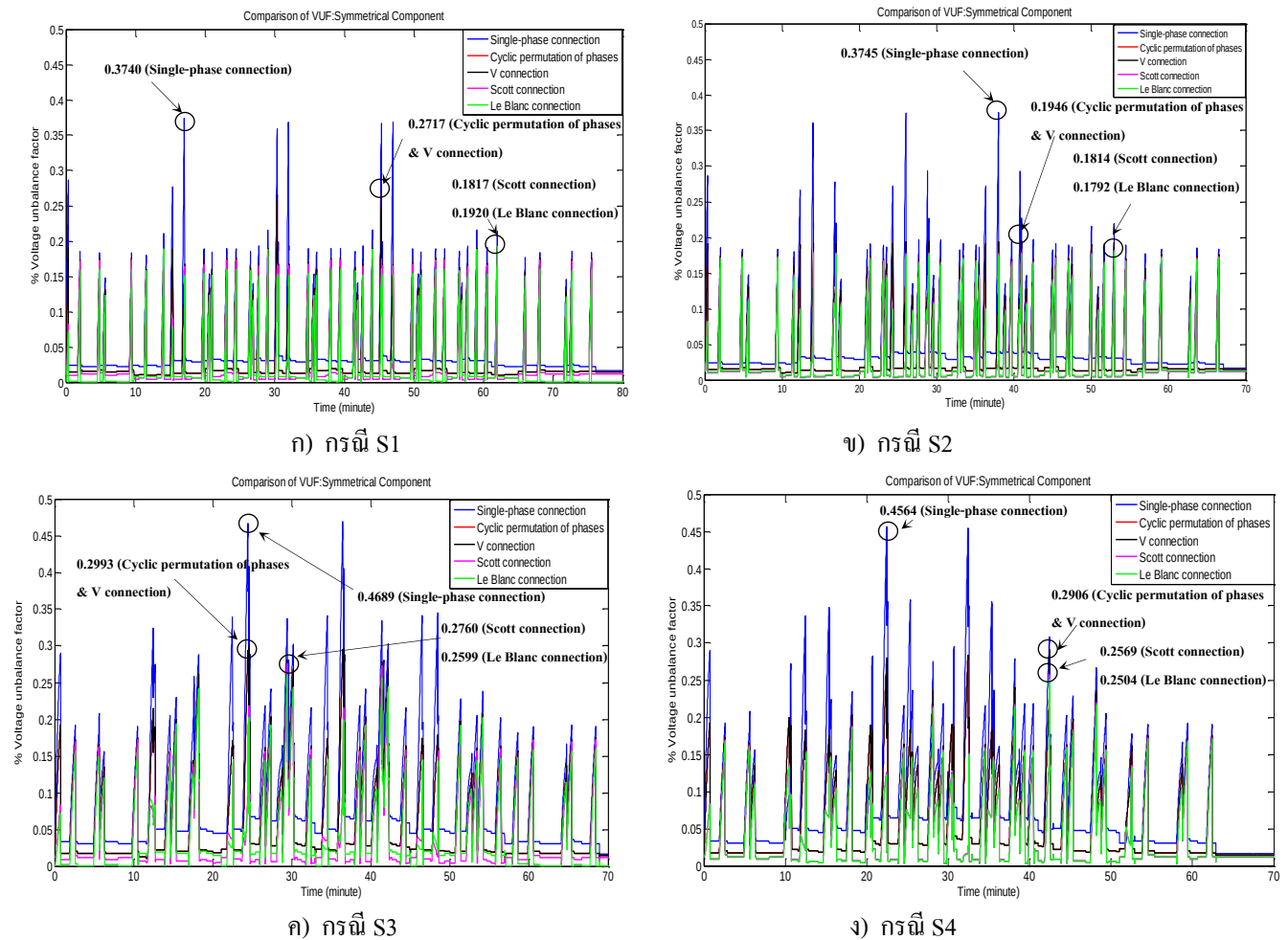
ตารางที่ 1 รูปแบบเงื่อนไขการทดสอบของรถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ

Scenario	Headway (min)	Train configuration	Total weight (ton)	Auxiliaries power (kW)
S1	15	3 car train	183.67	200
S2	12	3 car train	183.67	200
S3	12	7 car train	422.64	450
S4	10	7 car train	422.64	450



รูปที่ 11 ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้า และรูปแบบการเดินรถไฟฟ้า

จากการจำลองผล และการคำนวณตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ โดยการเปลี่ยนการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่าง ๆ การเปรียบเทียบ %VUF ของแต่ละรูปแบบเงื่อนไขการทดสอบของรถไฟฟ้าตลอดช่วงตารางการเดินรถไฟฟ้า นำเสนอดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบค่า %VUF ในแต่ละรูปแบบการเดินรถไฟ

เปรียบเทียบกรณี S2 กับ S3 ในรูปที่ 12 ข) กับ 12 ค) มี headway เท่ากันเท่ากับ 12 min แต่กรณี S3 มีน้ำหนักสุทธิของรถไฟ และโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าบนรถไฟมากกว่ากรณี S2 จากรูปทั้งสองจะสังเกตได้ว่า ค่า %VUF ของกรณี S3 มีค่ามากกว่ากรณี S2 เนื่องจากน้ำหนักสุทธิของรถไฟ และโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าบนรถไฟมากขึ้น ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนรถไฟมากขึ้นตามไปด้วย แรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อรถไฟกับสายตัวนำเหนือศีรษะเปลี่ยนแปลงมากขึ้น ส่งผลให้ %VUF มากขึ้น และการเชื่อมต่อหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสดับแบบเลอบลองทำให้ค่า %VUF ต่ำกว่าการเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบอื่น ๆ (0.18 % สำหรับ S2 และ 0.26% สำหรับ S3)

พิจารณารณน้ำหนักสุทธิของรถไฟ และโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าบนรถไฟเท่ากันในกรณี S1 กับ S2 แต่ headway ต่างกัน ในรูปที่ 12 ก) และ 12 ข) จากผลการจำลองจะสังเกตเห็นว่า %VUF ของกรณี S2 ที่มี headway 12 min มีค่าน้อยกว่ากรณี S1 ที่มี headway 15 min เนื่องจาก headway ที่ใช้เวลานานกว่า จะมีโอกาส และช่วงเวลาที่จำนวนขบวนรถไฟในส่วนหม้อแปลงฝั่งซ้ายมือและขวามือเท่ากันมากกว่า headway ที่ใช้เวลานานกว่า ทำให้ %VUF ของการเดินรถไฟที่ headway สั้น จะมีความ

เป็นไปได้ที่จะมีค่าน้อยกว่าการเดินรถไฟไฟฟ้าที่ headway ยาวกว่า ผลการจำลองกรณี S3 เปรียบเทียบกับ S4 จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการเปรียบเทียบกรณี S1 กับ S2

จากการเปรียบเทียบพบว่าในช่วงเวลา headway เท่ากัน แต่น้ำหนักของรถไฟไฟฟ้าและโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าบนรถไฟไฟฟ้าที่มากขึ้นจะทำให้ %VUF มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย และที่น้ำหนักสุทธิ และโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าบนรถไฟไฟฟ้าเท่ากัน แต่ช่วงเวลา headway ที่มากขึ้นทำให้ %VUF มีค่ามากขึ้นด้วยเช่นกัน นอกจากนี้จากผลการจำลองยังสังเกตได้ว่า ในทุกกรณีที่ %VUF สูงที่สุด เป็นผลเนื่องมาจากช่วงเวลานั้น ๆ มีรถไฟไฟฟ้าให้บริการเป็นจำนวนมาก และรถไฟไฟฟ้าอยู่ในช่วงการเร่งความเร็ว และจากผลการจำลองในรูปแบบที่ 12 %VUF สูงที่สุดในแต่ละรูปแบบเงื่อนไขการเดินรถไฟไฟฟ้า และการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 %VUF สูงที่สุดในแต่ละรูปแบบเงื่อนไขการเดินรถไฟไฟฟ้า และการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่าง ๆ

Connection type	%VUF _{max}			
	S1	S2	S3	S4
Single-phase connection	0.3740	0.3745	0.4689	0.4564
Cyclic permutation of phases	0.2717	0.1946	0.2993	0.2906
V connection	0.2717	0.1946	0.2993	0.2906
Scott connection	0.1817	0.1814	0.2760	0.2569
LeBlanc connection	0.1920	0.1792	0.2599	0.2504

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการศึกษาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของระบบรถไฟไฟฟ้ากระแสสลับด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink โดยทำการประเมินจาก %VUF เมื่อพิจารณาการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ 5 รูปแบบ ได้แก่ การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสเดียว แบบสลับคู่เฟส แบบวี แบบสกอตต์ และแบบเลอบลองก์ ในกรณีเปลี่ยนช่วงเวลา headway และน้ำหนักสุทธิของรถไฟไฟฟ้าและโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าบนรถไฟไฟฟ้า สรุปได้ว่า %VUF ที่มากขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากน้ำหนักสุทธิของรถไฟไฟฟ้าและโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าบนรถไฟไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และช่วงเวลา headway ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยกตัวอย่างการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอบลองก์จะมีค่า %VUF ต่ำกว่าแบบเฟสเดียว 52.15% แบบสลับคู่เฟส 7.91% แบบวี 7.91% และแบบสกอตต์ 1.21% ในลักษณะรูปแบบเงื่อนไขการเดินรถไฟไฟฟ้ากรณี S2 เป็นต้น และมีค่า %VUF ไม่เกินมาตรฐาน IEEE 1159 – 2009 ดังนั้นสำหรับแผนการขยายเส้นทาง เพิ่มระยะทาง และเพิ่มจำนวนรถไฟไฟฟ้า ควรเลือกใช้งานการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอบลองก์เพื่อลดปัญหาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นในระบบรถไฟไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุนกิตติบัณชิต ประจำปีการศึกษา 2558

เอกสารอ้างอิง

- [1] Suvarnabhumi Airport Rail Link, 2016. Available from: <http://www.srtet.co.th> [Accessed 22 Sep 2016].
- [2] Mingpruk, N., Leeton, U. and Kulworawanichpong, T. Modeling and simulation of voltage unbalance in AC electric railway systems using MATLAB/Simulink. *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, 2016, pp. 13–18.
- [3] Institute of Electrical and Electronic Engineers. IEEE std 1159 – 2009 (Revision of IEEE std 1159 - 1995). *ieee recommended practice for monitoring electric power quality*, 2009.
- [4] Goodman, C.J. *Train performance and simulation*, Fourth Vocation School on Electric Traction Systems, IEE Power Division, April 1997.
- [5] Rochard, B. P. and Schmid, F. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. *A review of methods to measure and calculate train resistances*, 2000, pp. 185 – 199.
- [6] Kulworawanichpong, T. *Optimising AC electric railway power flows with power electronic control*, PhD Thesis, University of Birmingham, UK, November 2003.
- [7] Ciccirelli, F., Fantauzzi, M., Lauria, D. and Rizzo, R. *Special Transformers Arrangement for AC Railway Systems*, Department of Electrical Engineering University of Naples Federico II, Naples (Italy), 2014.
- [8] Kiessling, F. (ed.) *Contact Lines for Electric Railways*, 2th ed. Erlangen: Suranaree University of technology, 2009, pp. 664–666.
- [9] British Standards Institution. BS EN 50149:2012. *Railway applications-Fixed installations-Electric traction-Copper and copper alloy grooved contact wires*. London: BIS, 2012, pp. 12–14.